10Ч

УДК 535.242.65:535.242.67:577.354.2

А.Ф. Чебанов
Государственный университет информатики и искусственного интеллекта
г. Донецк, Украина

Некоторые аспекты механизма аккомодации оптической системы глаза и их приложение к системам технического зрения

В статье рассматриваются вопросы функционирования механизма фокусировки оптической системы глаза. Показано, что аккомодация глаза не сводится только к изменению формы и размеров хрусталика, а имеет более сложную природу, свидетельствующую о наличии в оптической системе глаза механизма тонкой фокусировки.

Введение

Ощущения, вызванные внешней средой, воспринимаются органами чувств – комплексом анатомических структур, которые, воспринимая энергию внешнего раздражения, превращают ее в нервный импульс, поступающий в определенный отдел мозга, где происходит анализ ощущений, вызвавших нервный импульс [1]. Среди органов человека и высших позвоночных животных важнейшим является зрительная сенсорная система (зрительный анализатор), поскольку она дает более 90% информации, идущей к мозгу от всех рецепторов. Фоторецепторная система является и самой сложной среди других сенсорных систем; эта сложность определяется особенностями ее развития, в ходе которого она закладывается как часть центральной нервной системы и затем выдвигается на периферию, где дифференцируется в светопринимающую структуру глаза – сетчатку [2].

Зрительное восприятие – многозвенный процесс, начинающийся с проекции изображения на сетчатке глаза и возбуждения фоторецепторов и заканчивающийся принятием высшими отделами зрительного анализатора, локализованными в коре мозга, решения о наличии в поле зрения того или иного объекта.

Глаз человека – приблизительно шарообразное тело с поперечником около 2,5 см [3]. **Роговица** имеет радиус кривизны – около 7 – 8 мм. Толщина роговицы в центре – около 0,8 – 0,9 мм, на периферии 1,1 – 1,2 мм [4], [5].

Радужная оболочка – пигментные клетки, определяющие «цвет глаз», и круговые и радиальные гладкие мышцы. Сокращение первых сужает зрачок, а вторых – расширяет его. В центре радужной оболочки находится отверстие – зрачок, через который лучи света проходят внутрь глаза. Зрачок способствует четкости изображения предметов на сетчатке, пропуская только центральные лучи и устраняя тем самым сферическую аберрацию.

Сужение зрачка наступает и при рассматривании близкорасположенных предметов, когда происходит аккомодация и сведение зрительных осей обоих глаз (конвергенция).

Хрусталик – прозрачная двояковыпуклая линза диаметром около 9 мм и показателем преломления 1,4, имеющая переднюю и заднюю поверхности сферической формы. Радиус кривизны передней поверхности хрусталика при аккомодации уменьшается с 10 до 6 мм, а задней поверхности – с 6 до 5,5 мм [5], [6]. Толщина хрусталика колеблется в пределах 3,7 – 4,4 мм в зависимости от степени аккомодации [1].

Хрусталик заключен в эластичную тонкостенную сумку, переходящую на краях в круглую циановую связку, прикрепленную к ресничному телу. Ресничное тело делится на две части – внутреннюю – ресничный венец и наружную – ресничный кружок, от поверхности которого к хрусталику отходят 70 – 75 ресничных отростков длиной около 2 мм каждый, к которым прикрепляются волокна ресничного пояска (циановой связки), идущие к хрусталику.

Стекловидное тело заполняет пространство между сетчаткой и хрусталиком. Оно представляет собой аморфное вещество желеобразной консистенции, его индекс светопреломления – 1,334 [1].

Камеры глаза. Радужная оболочка разделяет пространство между роговицей с одной стороны и хрусталиком с циановой связкой и ресничным телом с другой на две камеры – переднюю и заднюю, которые играют важную роль в циркуляции водянистой влаги внутри глаза. Водянистая влага – жидкость с очень низкой вязкостью, она вырабатывается капиллярами ресничных отростков и радужки. Передняя камера сообщается с венозным синусом склеры, а последний – с системой вен, куда стекает водянистая влага. Благодаря циркуляции влаги сохраняется равновесие между ее секрецией и всасыванием, что и является стабилизирующим фактором внутриглазного давления [1].

Сетчатка представляет собой внутреннюю оболочку глаза, имеющую сложную многослойную структуру. Здесь расположены два вида различных по своему функциональному значению фоторецепторов – палочки и колбочки и несколько видов нервных клеток. Под влиянием световых лучей в фоторецепторах происходят фотохимические реакции, состоящие в изменении светочувствительных зрительных пигментов. Это вызывает возбуждение фоторецепторов и затем синаптическое возбуждение связанных с фоторецепторами нервных клеток. Последние образуют собственно нервный аппарат глаза, который передаёт зрительную информацию в центры головного мозга и участвует в её анализе и переработке [7].

Итак, оптическая система состоит из трех преломляющих сред, расположенных одна за другой. Первая среда, образованная воздухом, роговицей и водянистой влагой, по своему действию сходна с менисковой линзой. Двояковыпуклый хрусталик служит второй преломляющей средой; стекловидное тело глаза, действующее подобно вогнуто-плоской линзе, – третьей средой. На пути к светочувствительной оболочке глаза – сетчатке – лучи света проходят через несколько прозрачных поверхностей – переднюю и заднюю поверхности роговицы, хрусталика и стекловидного тела. Разная кривизна и показатели преломления этих поверхностей определяют преломление световых лучей внутри глаза. Преломляющую силу оптических систем выражают в диоптриях. Одна диоптрия равна преломляющей силе линзы с фокусным расстоянием 100 см. Преломляющая сила глаза человека составляет 58,6 диоптрий при рассматривании далеких и 70,5 диоптрий при рассматривании близких предметов [7].

Расположение зрачка, хрусталика и сетчатки напоминает расположение частей фотоаппарата. Однако глаз как физический прибор следует признать очень несовершенным. Отдельные преломляющие среды не имеют общей оптической оси. Ее заменяет линия наблюдения, для изменения направления которой служит кинематический механизм, обеспечивающий совмещение на одной прямой точки наблюдения и центральной ямки сетчатки.

Сложность оптической системы глаза затрудняет точную оценку хода лучей внутри него и оценку размера изображения на сетчатке. Поэтому если не стремиться узнать распределение света в самых тонких деталях изображения, а интересоваться лишь местоположением, размером, освещенностью и резкостью контуров изображения на сетчатке, то светопреломляющий аппарат глаза можно рассматривать как центрированную систему сферических поверхностей, между которыми находятся оптически однородные среды, т.е. пользоваться упрощенной моделью. Таких моделей несколько. «Редуцированный глаз» Вербицкого представляет собой одну преломляющую поверхность – роговицу, за которой находится стекловидное тело [8]. Гораздо точнее описывает распределение показателей преломления внутри глаза «схематический глаз» Гульстранда, содержащий шесть преломляющих поверхностей [9], [10]. Однако и глаз Гульстранда не описывает многих дефектов преломляющей системы реальных глаз. Для расчетов масштаба и освещенности изображения на сетчатке достаточно применить модель «редуцированного» глаза. В основе расчетов лежит формула Ньютона [3]

$$a \cdot a' = f \cdot f', \tag{1}$$

где *a* – расстояние от светящейся точки *P* до переднего фокуса *F*, *a'* – расстояние от заднего фокуса *F'* до изображения точки *P'*, *f* – переднее фокусное расстояние, *f'* – заднее фокусное расстояние. Следует отметить, что формула Ньютона верна и для сложных систем, состоящих, как глаз человека, из многих преломляющих поверхностей (только для них *f* и *f'* вычисляются сложнее) [11].

Как известно, распространение света – волновой процесс, а лучи света – это перпендикуляры к волновым поверхностям.

Характерной особенностью световой волны в каждом ее положении является ее кривизна. Действие таких приборов, как сферические линзы очков, объективы фотоаппаратов, роговица и хрусталик глаза заключаются в том, что они определенным образом изменяют кривизну световых волн так, что волны, концентрически расходившиеся от одной точки – источника света *P*, образуют новую систему сферических концентрических волн, либо сходящихся к некоторой точке – действительному фокусу *F'*, либо расходящихся, как если бы они вышли из другой точки – мнимого фокуса *F* [2], [4].

При прохождении света через собирающие линзы кривизна волны увеличивается, а при прохождении через рассеивающие – уменьшается.

По формуле Ньютона легко показать, что изменение расстояния объекта от глаза, соответствующее изменению кривизны попадающих в глаз световых волн на одну диоптрию, смещает изображение вдоль оси глаза примерно на 0,4 мм. Действительно, если объект – точка *P* – находится в a метрах от переднего фокуса *F*, то световые волны приходят в *F*, имея кривизну $R = -1/a$. Из (1) следует, что $a = -f \cdot f' \cdot R$. Таким образом смещение изображения вдоль оси глаза Δa пропорционально изменению кривизны приходящей к глазу волны ΔR.

Аккомодация. Для ясного видения предмета необходимо, чтобы лучи от его точек попадали на поверхность сетчатки, т.е. были здесь сфокусированы. Фокусирование глаза – его приспособление к четкому видению различно удаленных предметов – называется аккомодацией. У человека аккомодация осуществляется за счет изменения формы хрусталика. Это не единственный возможный способ: в глазах рыб, например, для наведения на резкость хрусталик передвигается к роговице без изменения своей формы [4].

При рассматривании близких предметов радиусы кривизны поверхностей хрусталика уменьшаются, уменьшается его заднее фокусное расстояние, и передний фокус приближается к роговице. На сетчатке оказываются резкими изображения более близких предметов.

Пределы возможностей аккомодации определяются тем, на каких расстояниях от глаза находится точка, резко видимая при полностью расслабленной аккомодации, – «дальняя точка» глаза и точка, видимая резко при максимальном усилии аккомодации, – «ближняя точка» глаза. Для нормального глаза молодого человека «дальняя точка» ясного видения находится в бесконечности. «Ближняя точка» ясного видения находится на расстоянии 10 см от глаза. Сила аккомодации может быть выражена в диоптриях.

Управление аккомодацией. Степень резкости изображения определяется точностью аккомодации, т.е. правильностью подбора формы хрусталика. Форма хрусталика определяется напряжением ресничной мышцы, которая, в свою очередь, зависит от результата бессознательного анализа качества изображения в области центральной ямки: «нерезкость» изображения является стимулом для изменения аккомодации. Система аккомодации является следящей, т.е. она удерживает в фокусе изображение удаляющегося или приближающегося предмета.

Феноменологическая трактовка такой системы основывается на общих принципах теории управления. В систему поступает сигнал, отличный от требуемого, от «уставки». Разность входного сигнала и «уставки» – сигнал ошибки. Назначение регулятора состоит в получении требуемого выходного сигнала. Система регулирования состоит из регулятора и объекта управления, она содержит контур обратной связи.

Напряжение аккомодации непрерывно колеблется около оптимального и четкость изображения всё время изменяется. Типичная амплитуда флуктуаций аккомодации – около 0,2 диоптрии. Величина дефокусировки 0,2 диоптрии соответствует изменению расстояния

предмета от глаза: от бесконечности до 5 м; от 5 до 2,5 м; от 1,25 до 1 м; от 53 до 48 см; от 23 до 22 см, т.е. чем меньше расстояние, на которое сфокусирован глаз, тем меньше глубина резко изображаемого пространства.

Роль движения глаз для зрения. При рассматривании любых предметов важную роль играют движения глаз. Движение глаз осуществляется при помощи шести мышц, прикреплённых к глазному яблоку, из них две косые и четыре прямые мышцы – наружная, внутренняя, верхняя и нижняя. Из них только наружная мышца поворачивает глаз прямо наружу, а внутренняя – прямо внутрь. Верхняя и нижняя прямые мышцы поворачивают глаз не только вверх или вниз, но и немного внутрь, поэтому чтобы повернуть глаз прямо вверх или вниз, к сокращению прямых мышц должно присоединиться сокращение косых мышц. Вероятно, роль косых мышц этим не ограничивается. Движение глаз совершается одновременно и согласованно. Рассматривая более близкие предметы, необходимо сводить, а рассматривая далёкие предметы – разводить зрительные оси. Сведение осей (конвергенция) осуществляется при помощи внутренних прямых мышц. Разведение зрительных осей (дивергенция) осуществляется напряжением наружных прямых мышц [6].

Целью данной работы является исследование механизма фокусировки оптической системы глаза и использование полученных результатов для проектирования и построения систем технического зрения.

Расчёты параметров изображения объектов при разных степенях аккомодации

Рассматривая глаз как саморегулируемую, следящую систему с обратной связью, следует отметить, что подобные системы обладают механизмом «грубой» и «тонкой» регулировки параметров системы.

Вероятно, механизм тонкой регулировки (фокусировки) должен быть присущ и системе аккомодации глаза. Как будет показано далее, при нахождении предмета в «ближней точке» (максимальная аккомодация) его изображение находится перед сетчаткой на расстоянии 0,5 – 0,7 мм. Выше было показано, что чем меньше расстояние до объекта, на котором сфокусирован глаз, тем меньше глубина резко изображаемого пространства и тем точнее должна быть фокусировка для ясного видения.

Для получения резкого изображения предмета на сетчатке в этом случае необходим дополнительный механизм фокусировки, смещающий изображение предмета на сетчатку, поскольку сила аккомодации при этом достигает максимума.

Наличие механизма тонкой регулировки (фокусировки) в системе аккомодации глаза следует, вероятно, установить из определения местоположения изображения предмета относительно сетчатки при различных положениях предмета относительно глаза. Для этого необходимо определить, как меняются расстояния от второй главной плоскости до изображения предмета при разных степенях аккомодации глаза.

Указанные расстояния вычислялись по формуле Ньютона (1), которая была преобразована к виду:

$$S' = \frac{f' \cdot S \cdot n'}{\left(f' \cdot n + S \cdot n'\right)}, \qquad (2)$$

где *S’* – расстояние от задней главной плоскости до изображения, *S* – расстояние от предмета до передней главной плоскости, *f’* – заднее фокусное расстояние, *n* – показатель преломления воздуха, *n’* – показатель преломления вещества глаза.

В расчётах использованы параметры «схематического глаза» Гульстранда [9]. При проведении расчётов в диапазоне аккомодации 58,64 – 70,67 диоптрий, фокусные расстояния вычислялись по формуле

$$\Phi = -\frac{n}{f} = \frac{n'}{f'}, \qquad (3)$$

где *Φ* – оптическая сила, *n* и *n'* – показатели преломления, *f* – переднее фокусное расстояние, *f'* – заднее фокусное расстояние. Для воздуха *n = 1*, для вещества глаза *n = 1,336* (усреднённое значение). Расстояние *S* – сумма расстояний от предмета до первого фокуса *a* и переднего фокусного расстояния *f*, т. е. *S = a + f*.

Расстояние *a* до «дальней точки» принималось равным 10 м, до «ближней точки» – 10 см. В расчётах предполагали в соответствии с формулой Ньютона, что изменение расстояния предмета на один метр сопровождается изменением кривизны падающей волны и соответственно оптической силы на одну диоптрию.

Результаты расчётов, полученные по формуле (2), представлены в табл. 1. Здесь величина $\Delta S'$ есть разность значений *S'* – объект в «дальней точке» и в промежуточных точках, вплоть до «ближней точки». Величина $\Delta S''$ – разность значений *S'* в указанных точках, соответствующая изменению оптической силы на одну диоптрию.

Таблица 1

f мм	f'мм	a мм 10^3	S мм 10^3	S'мм	$\Delta S'$мм	$\Delta S''$мм
17,055	22,785	10	10,0179	22,822	0,000	0,000
16,949	22,644	09	9,0170	22,686	0,136	0,136
16,667	22,266	08	8,0166	22,312	0,510	0,374
16,393	21,901	07	7,0163	21,952	0,870	0,360
16,129	21,548	06	6,0161	21,606	1,216	0,346
15,873	21,206	05	5,0158	21,273	1,549	0,333
15,625	20,875	04	4,0156	20,956	1,866	0,317
15,384	20,553	03	3,0153	20,658	2,164	0,298
15,151	20,242	02	2,0151	20,395	2,427	0,263
14,935	19,940	01	1,0149	20,238	2,584	0,157
14,705	19,647	0,5	0,5147	20,225	2,597	0,013
14,492	19,362	0,25	0,2644	20,484	2,338	–0,359
14,285	19,085	0,20	0,2142	20,448	2,374	0,035
14,170	18,931	0,089	0,1040	21,914	0,908	–1 ,465

Расчёты показывают, что при нахождении объекта в «дальней точке» расстояние *S'* практически совпадает с задним фокусным расстоянием, т.е. задний фокус в покое аккомодации находится на сетчатке. При приближении объекта к переднему фокусу, т.е. при уменьшении расстояния *S* переднее и заднее фокусные расстояния уменьшаются, расстояние *S'* также уменьшается. Уменьшение *S'* означает увеличение расстояния от изображения до сетчатки на величину Δ *S'*. Изображение объекта на сетчатке получается недостаточно четким, так величина Δ *S'* при изменении расстояния от объекта до глаза в интервале 10 – 0,5 м увеличивается от 0,15 до 2,60 мм; в соответствии с вышеизложенным, для получения чёткого изображения необходимо увеличение оптической силы на несколько диоптрий, в то время как оптическая сила близка к максимальной. В интервале 0,5 – 0,1 м указанная величина уменьшается до 0,9 мм. Отсюда следует, что, несмотря на максимальную степень аккомодации, глаз недоаккомодирован, и поэтому необходимо наличие дополнительного механизма

фокусировки, а именно механизма тонкой фокусировки, позволяющей в этих условиях перемещать изображение на сетчатку. Глаз, как и любая следящая система с обратной связью, также должен обладать механизмом как грубой, так и тонкой фокусировки. Как известно, вместе с увеличением кривизны хрусталика и сужением зрачка происходит сведение зрительных осей (конвергенция), осуществляемое прямыми мышцами. Связь этих явлений – физиологический факт, представляющий собой механизм грубой фокусировки.

Возникает вопрос, какая роль отведена косым мышцам. Согласно физиологическим представлениям, чтобы повернуть глаз прямо вверх или вниз, к сокращению прямых мышц должно присоединиться сокращение косых мышц. Однако с точки зрения физической механики, наличие четырёх прямых мышц, расположенных взаимно перпендикулярно, может вполне обеспечить движение глаз во всех направлениях. Что касается косых мышц, то более вероятно, что функционально они предназначены для осуществления тонкой фокусировки объектов на сетчатке.

Экспериментальные измерения параметров оптической системы глаза

Такое предположение базируется не только на теоретических расчётах, но и на экспериментальных данных, любезно предоставленных Ю.М. Должиковым.

В экспериментах измерения параметров оптической системы глаза проводились в «дальней точке», на расстоянии 10 м, и в «ближней точке», на расстоянии 10 см.

В первой серии опытов измерялись глубина камеры, толщина хрусталика и длина глаза. Во второй серии опытов измерялись те же параметры, но вместо длины глаза измерялось расстояние от задней поверхности хрусталика до сетчатки.

Измерения в первой серии опытов показывают, что при аккомодации на «ближнюю точку» глубина камеры и длина глаза уменьшаются. Так, при нахождении объекта на расстоянии 20 см от переднего фокуса глубина камеры уменьшается в среднем на 0,30 мм, а длина глаза на 0,32 мм. Толщина хрусталика при этом увеличивается на 0,06 мм. При расстоянии от предмета до переднего фокуса, равном 5 см, уменьшение глубины камеры составляет примерно 1 мм, а длины глаза – 0,5 мм. Толщина хрусталика увеличивается на 0,17 мм.

Во второй серии опытов при аккомодации на «ближнюю точку» уменьшение глубины камеры колеблется от 0,20 до 0,30 мм, а расстояние от хрусталика до сетчатки – от 0,22 мм до 0,27 мм. Увеличение толщины хрусталика составляет 0,08 – 0,17 мм.

Полученные экспериментальные данные показывают, что при аккомодации на «ближнюю точку» уменьшение глубины камеры, обусловленное сжатием глаза, и, как следствие, смещением хрусталика к роговице, имеет величину, соизмеримую с величиной изменения длины глаза и величиной изменения расстояния от хрусталика до сетчатки.

Отсюда следует, что сжатие глаза при аккомодации на ближние объекты можно отнести к механизму тонкой регулировки процесса аккомодации. Наличие механизма тонкой регулировки (фокусировки) обеспечено особенностями физиологического строения глаза. Действительно, хрусталик, заключённый в тонкостенную сумку, подвешен на 70 – 75 ресничных отростках длиной около 2 мм каждый. Это даёт возможность хрусталику при сжатии глаза смещаться к роговице на указанные выше расстояния.

Возникающее при перемещении хрусталика избыточное гидростатическое давление жидкости снижается за счёт её оттока из передней камеры через венозный синус склеры (шлемов канал).

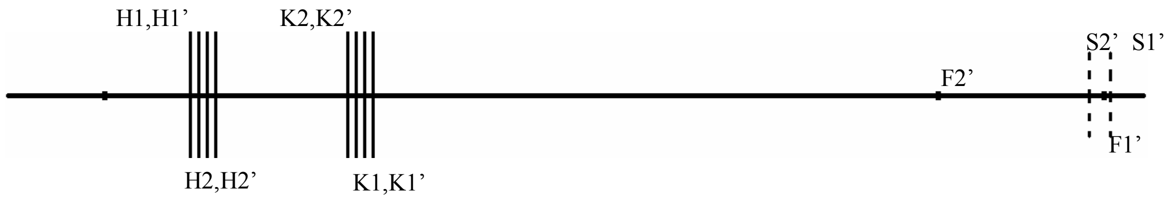


Рисунок 1 – Центрированная оптическая система глаза

H1 H1' – передняя и задняя главные плоскости (объект в «дальней точке»)
H2 и H2' – передняя и задняя главные плоскости (объект в «ближней точке»)
K1 и K1' – передняя и задняя узловые плоскости (объект в «дальней точке»)
K2 и K2' – передняя и задняя узловые плоскости (объект в «ближней точке»)
F1' – задний фокус (объект в «дальней точке»)
F2' – задний фокус (объект в «ближней точке»)
S1' – расстояние от задней главной плоскости до изображения
F1' и S1' – объект в «дальней точке»
F2' и S2' – объект в «ближней точке»

На основе расчётных данных построена центрированная система глаза (рис. 1). На рисунке показаны главные плоскости, их положение при нахождении объекта в «дальней» и «ближней» точках, положения задних фокусов, указаны расстояния от задней плоскости до изображения. Следует отметить, что при приближении объекта к «ближней точке» обе главные плоскости смещаются к сетчатке примерно на 0,5 мм относительно их положения при нахождении предмета в «дальней точке». Величина $\Delta S'$ равна при этом 0,9 мм, но с учётом смещения задней главной плоскости изображение предмета находится на расстоянии 0,4 мм от сетчатки. В соответствии с формулой Ньютона, для смещения изображения к сетчатке на 0,4 мм требуется дополнительное увеличение кривизны световой волны, а следовательно, и оптической силы на одну диоптрию, что в данном случае весьма затруднительно.

Отсюда следует, что, наряду с увеличением кривизны хрусталика, сужения зрачка и сведения зрительных осей, необходим дополнительный механизм фокусировки, достигаемый сжатием глаза.

Заключение

Результаты исследований показывают, что аккомодация глаза не сводится к изменению размеров хрусталика, его кривизны и толщины и, соответственно, к изменению фокусных расстояний, а имеет более сложный характер, свидетельствующий о наличии дополнительного механизма аккомодации. Действительно, теоретические расчёты и экспериментальные измерения дают практически совпадающие результаты, свидетельствующие о наличии в оптической системе глаза как следящей системе механизма грубой и тонкой фокусировки.

Грубая фокусировка осуществляется увеличением кривизны хрусталика, сужением зрачка и сведением зрительных осей. Тонкая фокусировка осуществляется сжатием глаза косыми мышцами.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что оптическая система глаза, являясь следящей системой, как и любая подобная система, имеющая механизм грубой и тонкой регулировки, также обладает механизмом как грубой, так и тонкой фокусировки, позволяющей удерживать изображение на сетчатке при изменении расстояния объекта от глаза.

Выводы

1. Проведены расчеты расстояний от второй, задней главной плоскости до изображения предмета. Показано, что при приближении предмета к первой, передней главной плоскости его изображение фокусируется перед сетчаткой на разных расстояниях от нее. Показано, что для получения четкого изображения предмета необходим дополнительный механизм фокусировки, смещающий изображение на сетчатку.

2. Экспериментальные исследования показали, что при аккомодации на ближний предмет происходит сжатие глаза, сопровождающееся смещением хрусталика к роговице и, как следствие, уменьшением глубины передней камеры.

3. Показано, что расчётные и экспериментальные данные совпадают в пределах ошибок измерения. Эти данные с большой долей вероятности позволяют утверждать, что оптическая система глаза обладает механизмом тонкой фокусировки.

4. На основании полученных результатов высказано предположение, что механизм тонкой фокусировки оптической системы глаза осуществляется косыми мышцами, функциональное назначение которых – сокращение длины глаза с целью смещения изображения близко расположенных предметов на сетчатку.

Литература

1. Сапин Р. Анатомия человека / Р. Сапин, Г.А. Белич. – М. : Высш. шк., 1989. – 544 с.
2. Волькенштейн М.В. Биофизика / Волькенштейн М.В. – М. : Наука, 1988. – 590 с.
3. Физиология сенсорных систем. Часть первая. Физиология зрения. – Л. : Наука, 1971. – 232 с.
4. Физиология человека / [под ред. Г.И. Косицкого]. – М. : Медицина, 1985. – 560 с.
5. Ремизов А.И. Курс физики, электротехники и кибернетики для медицинских институтов / Ремизов А.И. – М. : Высш шк., 1982. – 607 с.
6. Синельников Р.Д. Атлас анатомии человека / Синельников Р.Д. – М. : Высш. шк., 1968. – Т. 3. – 652 с.
7. Элиот Л. Физика / Л. Элиот, У. Уилкокс. – М. : Наука, 1978. – 668 с.
8. Гершензон Е.М. Курс общей физики (оптика и атомная физика) / Гершензон Е.М. – М. : Высш. шк., 1981. – 240 с.
9. Байер В. Биофизика / Байер В. – М. : ИЛ, 1962. – 430 с.
10. Стейси Р.У. Основы биологической и медицинской физики / Стейси Р.У. – М. : ИЛ, 1959. – 285 с.
11. Детлаф А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М. : Высш. шк., 1979. – 511 с.

А.Ф. Чебанов

Деякі аспекти механізму акомодації оптичної системи ока і їх застосування щодо систем технічного зору

У статті розглядаються питання функціонування механізму фокусування оптичної системи ока. Показано, що акомодація не зводиться тільки до зміни форми і розміру кришталика, а має більш складну природу, що свідчить про наявність в оптичній системі ока механізму тонкого фокусування.

A.F. Chebanov

Some Aspects of Mechanism Optical Eye System Accommodation and Their Application to System of Technical Vision

The article deals with problems of functioning focusing optical eye system. It is shown that the accommodation is not only changing forms and sizes of crystallens, but has more complicated nature, showing availability in optical eye system the mechanism of smooth focusing.

Статья поступила в редакцию 25.06.2009.